

正会員 六車 照 (京都大学) ○渡辺 史夫 (京都大学)

1. 序

地震荷重を受ける鉄筋コンクリート（以下RCと略記）骨組は、その構成部材すなわち柱および梁に充分な塑性変形能力（じん性）を付与し、入力エネルギーを消費するよう設計されねばならない。部材に充分なじん性を与える為には、引張鉄筋量の制限および圧縮側コンクリートの横拘束などによる断面の塑性回転能力の改善に加えて、急激なせん断破壊現象の防止がきわめて重要である。これは適当な量のせん断補強筋を配置する事により実現されるが、通常、必要せん断補強筋量は部材の両端部断面が静的降伏モーメントに到達する時の部材せん断力にもとづいて決定される。しかしながら、地震荷重のもとではRC骨組は大きな繰り返し塑性変形を受け、その間せん断力伝達機構が徐々に劣化していく可能性がある。すなわち、全伝達せん断力にしろめるいわゆるコンクリートの負担分（圧縮域コンクリートのせん断抵抗、せん断ひびわれ面における骨材のかみ合い作用等）が繰り返しせん断力を受ける事により減少し、せん断補強筋による負担せん断力（トラス作用）が増加する。ここで、せん断補強筋引張応力とその降伏強度に到達するとトラス機構により負担されるせん断力は頭打ちとなり、加えてせん断ひびわれ巾の過度な増大によりコンクリートの負担するせん断力が急激に減少し、結果として部材は急激なせん断破壊を示す事になる。

本研究は、繰り返し塑性変形をうけるRC柱において、せん断補強筋の降伏現象がその履歴復元力特性におよぼす諸影響を実験的に解明する事を目的としている。実験は、2種類の降伏強度をもつ帯筋（ 3000kgf/cm^2 および 11740kgf/cm^2 ）により横補強された計9体の柱供試体（せん断補強筋比 $\rho_w = 0.224 \sim 0.45\%$ ）につき実施された。実験に際しては、せん断補強筋（帯筋）の降伏現象およびその負担するせん断力を把握するために、帯筋ひずみの詳細な測定が行なわれた。

2. 試験計画

2-1 使用材料

コンクリート——山砂，川砂利および普通ポルトランドセメントを用いた普通コンクリートで、その重量配合比は、1：2.83：3.28，水セメント比は57%であった。（混和剤：ホゾリス10Lを0.5%使用）

鉄筋——軸方向鉄筋としてD19mm，SD35（ネジコン），帯筋として $\phi 6\text{mm}$ ，SR24および $\phi 6.2\text{mm}$ 異形PC鋼材（ウルボン）を用いた。

2-2 供試体

供試体は、図1. a) に示すような片持梁形式で、柱断面は $25 \times 25\text{cm}$ の正方形とした。軸方向鉄筋は断面4隅に配筋され、柱上端部および下端部における軸鉄筋の付着すべりを除くため鋼製板を用いて定着された。帯筋は135度フックをもつ閉口型のもので、所定の間隔（ $s = 5, 7.5, 10\text{cm}$ ）になるよう軸筋に緊結された。

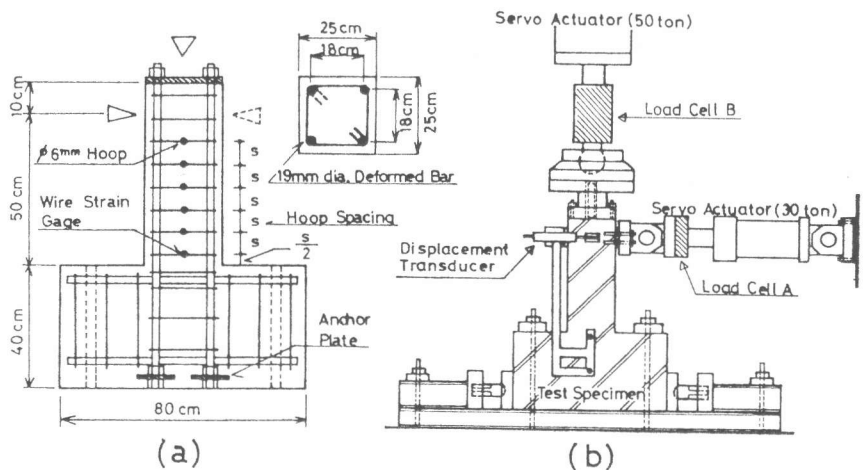
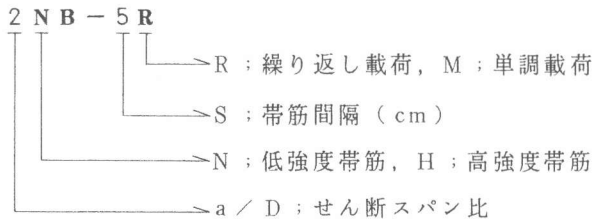


図1. 柱供試体寸法、配筋 a) および 剪断試験荷重測定装置概要 b)

コンクリートの打設は、柱軸を垂直として行ない、打設後2日で型枠を脱型し、実験まで湿布養生した。また供試体名称の意味は次のとおりである。



2-3 載荷および測定方法

図1. b) に載荷装置の概要を示す。供試体は2本のP C鋼材により耐力床に圧着され、2基のサーボアクチュエーターにより一定軸力および水平せん断力が加えられた。水平せん断力載荷位置におけるたわみは、供試体両側面に取り付けられた差動変圧器により測定し、ロードセルAにより検出した水平せん断力とあわせてX-Yレコーダーにより記録した。帯筋ひずみは、図1. a) に示すように、あらかじめ貼付したワイヤーストレインゲージにより検出した。

2-4 載荷履歴

柱軸力は、実験中一定の値(断面中心圧縮耐力の1/6. $N = 31.75 \text{ ton}$)に保持された。水平せん断力の加力は、柱脚部断面が降伏する時の柱水平方向たわみ(δ_y)を基準として、最大変位振幅 δ_y , $2\delta_y$, $4\delta_y$ および $5\delta_y$ において各々正負3回づつ繰り返し載荷する事を原則として行なった。(図2参照)

3. 実験結果およびその考察

表1. に使用鉄筋および試験時におけるコンクリート(材令26日)の力学的諸性質をまとめて示す。図3および図4. に普通鋼材により横補強された柱供試体(2NB-10Rおよび2NB-7.5R)の履歴復元力特性を示す。同図中には、一方向単調載荷試験より得られた水平せん断力-たわみ曲線を破線により、あわせて示した。なおこれらの図中における縦軸(水平せん断力)の値は、柱頭部の水平変位にともなって生じる軸方向力荷重の水平成分による補正が加えられている。同図より明らかなように、両供試体ともに最大変位振幅 $\pm 2\delta_y$ までは安定した履歴特性を示すが、2NB-10R供試体は変位振幅 $\pm 4\delta_y$ の+2回目の載荷サイクルにおいて、また2NB-7.5R供試体は変位振幅 $\pm 4\delta_y$ の-1回目の載荷サイクルにおいて急激なせん断破壊現象を示した。この現象は、帯筋ひずみの測定結果より、主せん断ひびわれを横切る帯筋が荷重サイクルの増加とともに順次降伏して行き、最終的に全帯筋が降伏した事により生じたものと考えられる。一方、高強度鋼材により横補強された柱供試体(2HB-10Rおよび2HB-5R)の履歴復元力特性を一方向単調載荷試験結果とあわせて、図5.および図6.に示す。同図より明らかなように、2HB-10R供試体は、変位振幅 $\pm 4\delta_y$ までは、安定した履歴曲線を示し、変位振幅 $\pm 5\delta_y$ の+1回目の載荷サイクルにおいて、圧縮側コンクリートの圧壊により徐々に耐力の低下を生じた。また、2HB-5R供試体も同様に安定した履歴曲線を示し、変位振幅 $\pm 5\delta_y$

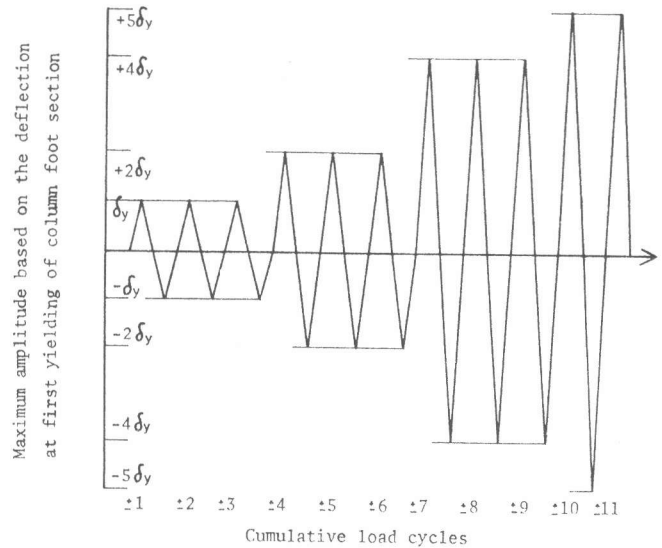


図2. 正負繰り返し載荷試験における基本的載荷履歴

表1. 使用鉄筋および試験時におけるコンクリートの力学的性質

Concrete properties at the age of loading tests	Compressive strength	267 kgf/cm ²	
	Tensile strength	25.1 kgf/cm ²	
	Modulus of elasticity	240900 kgf/cm ²	
Longitudinal reinforcement (19 mm in dia. deformed bar)	Yield strength	3850 kgf/cm ²	
	Modulus of elasticity	2079000 kgf/cm ²	
Web reinforcement (6 mm in dia. round bar)	N*	Yield strength (0.2% off-set stress)	3000 kgf/cm ²
		Modulus of elasticity	1882000 kgf/cm ²
	H ⁺	Yield strength (0.2% off-set stress)	11740 kgf/cm ²
		Modulus of elasticity	2100000 kgf/cm ²

*Ordinary yield strength web reinforcement
+High yield strength web reinforcement

の+2回目の荷重サイクルにおいて、圧縮側コンクリートの圧壊により耐力低下をきたした。図3. 図4および図5. 図6.の比較より明らかなように、低強度鋼材により横補強された供試体が、帯筋の降伏現象により、急激なせん断破壊を示したのに対して、高強度鋼材により横補強された供試体では、帯筋の降伏現象は生じず、圧縮側コンクリートの圧壊により破壊に至るといふ顕著な履歴特性における差異が観察された。こうした差異の生じる過程につき次に考察する。

鉄筋コンクリート柱におけるせん断力は、大別して次のような伝達要因により負担される。

- 1) 柱脚部（もしくは柱頭部）圧縮域コンクリートのせん断抵抗。
- 2) 曲げせん断ひびわれもしくはせん断ひびわれ面における骨材のかみ合い作用。
- 3) ひびわれを横切る軸方向引張鉄筋のダウエル作用。

以上のいわゆるコンクリートの負担するせん断力に加えて、4) せん断補強筋（帯筋）により負担されるせん断力（トラスメカニズム）がある。H. P. J. TAYLOR¹⁾, R. C. FENWICK AND T. PAULAY²⁾等の研究によると、コンクリートの負担するせん断力に定める、2) 骨材のかみ合い作用の比率は、50%~75%にも達する事が報告されており、せん断力伝達機構において最も重要な伝達要因の一つであると考えられる。この骨材のかみ合い作用は、せん断ひびわれ巾に左右され、帯筋の降伏現象によりせん断ひびわれ巾が増大すると徐々に失われて行き、部材が全せん断力を負担出来なくなると破壊に至ると考えられる。図7. に単調荷重試験をおこなった4体の供試体につき、帯筋の負担するせん断力の全せん断力に定める割合を示す。低強度帯筋をもつ2供試体は、帯筋の降伏が生じるとせん断ひびわれ巾の拡大をとめない、骨材のかみ合い作用の劣化によりこの比率が増大して行く傾向がみられる。一方高強度帯筋をもつ供試体ではこの比率はほぼ一定となった。次に同様の比率を、繰り返し荷重を受ける代表的な供試体（2HB-5R）につき示したのが、

表2. 供試体柱断面の曲げ解析結果（平面保持を仮定）

	Moment t·m	Curvature 1/cm	Concrete strain at extreme compression fiber	Strain of tension reinf.
First yielding of column foot sec.	6.689	0.000165	0.00168	0.00187
Flexural capacity	7.123	0.000559	0.00358	0.00845

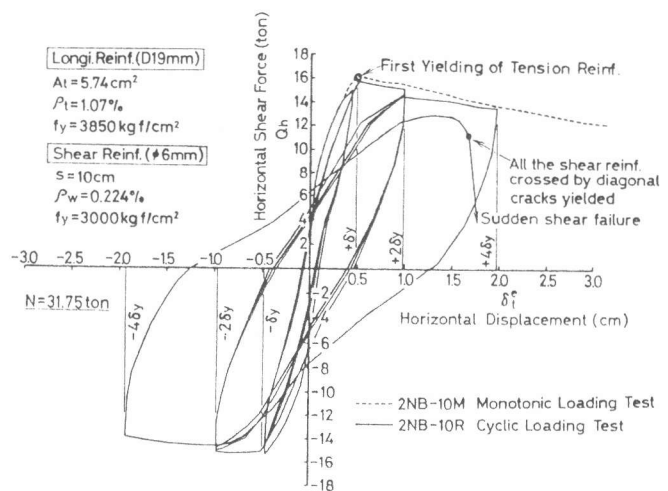


図3. 水平せん断力-たわみ曲線（低強度帯筋使用供試体）

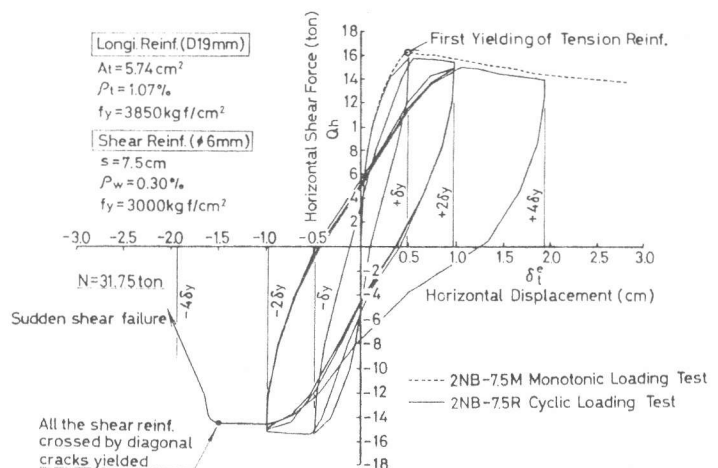


図4. 水平せん断力-たわみ曲線（低強度帯筋使用供試体）

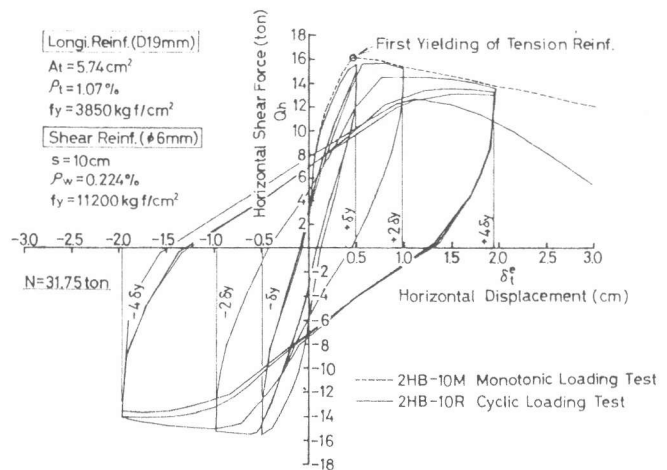


図5. 水平せん断力-たわみ曲線（高強度帯筋使用供試体）

図 8. である。同図において横軸は、柱頭部水平方向たわみ、縦軸は、全せん断力にしろる帯筋負担せん断力の比率であるが、載荷サイクル数が増加して行くにつれて、この比率が徐々に増大する。これは、すでにのべたコンクリートの伝達しうるせん断力のうち、2) の骨材のかみ合い作用が繰り返しせん断力により徐々に劣化したため、もし、せん断ひびわれを横切る帯筋がすべて降伏する事により、せん断力の帯筋への移行が頭打ちになると破壊に至る。

(図 3. 図 4. 参照) 図 9. に繰り返し載荷を受ける 2NB-10R および 2HB-10R 供試体の帯筋ひずみの変化を示す。図より明らかなように、低強度帯筋を有する 2NB-10R 供試体は、①, ②, ③の全帯筋の降伏によりせん断破壊が生じた。

4. 結語

繰り返しせん断力を受ける RC 柱においては、せん断ひびわれ面における骨材のかみあい作用が徐々に劣化し全せん断力にしろる帯筋の負担量が増加していく。

ここで、もし帯筋の降伏現象により帯筋負担せん断力が増加しなくなりかつ、せん断ひびわれ巾が過度に増大すると、全せん断力を負担出来なくなり、柱はせん断破壊する。よって繰り返しせん断力を受ける RC 柱は、降伏しないだけの十分な量の帯筋もしくは、降伏応力の大きな高強度帯筋によりせん断補強する必要がある。今後は、せん断力伝達機構の繰り返し荷重下で

の変化を実験的に明らかにし、合理的なせん断補強筋量とその降伏強度を決定するための諸知見を得ていく所存である。

1) H. P. J. Taylor "The fundamental behavior of reinforced concrete beams in bending and shear" C and C. A. Research Report Paper for publication PP/113 Dec. (1972)

2) R. C. Fenwick and T. Paulay "Mechanisms of shear resistance of concrete beams" Proc. of ASCE ST10 Oct. (1968)

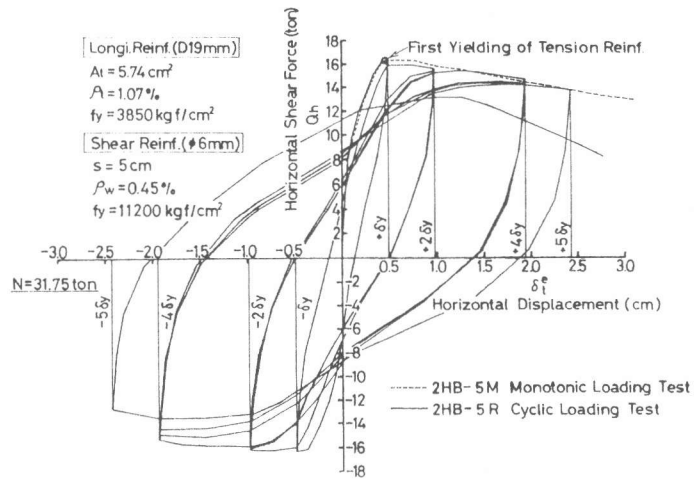


図 6. 水平せん断力-たわみ曲線 (高強度帯筋使用供試体)

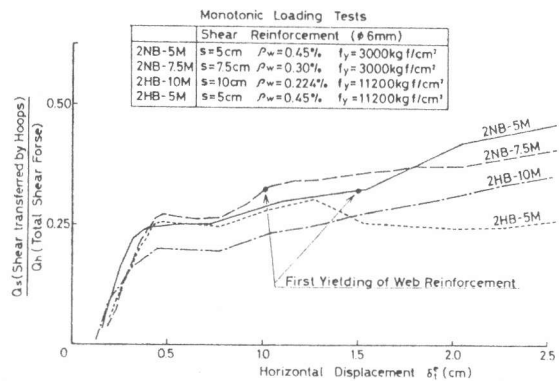


図 7. 全せん断力に対する帯筋負担せん断力の比率 (一方向単調載荷試験)

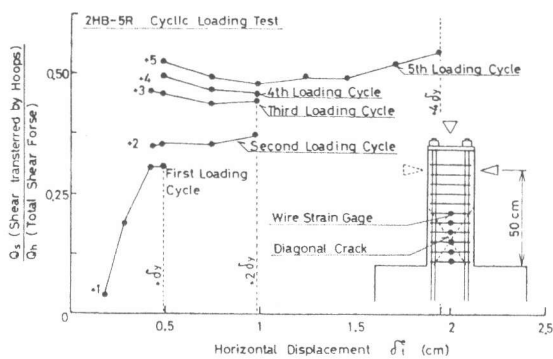


図 8. 全せん断力に対する帯筋負担せん断力の比率 (繰り返し載荷試験, 2HB-5R)

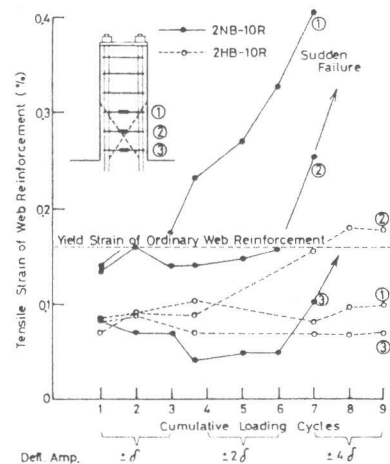


図 9. 繰り返し載荷時における帯筋ひずみの変化 (2NB-10R, 2HB-10R)